

◎ 특 집 : 연구실 소개

한국과학기술원 항공우주공학 전공 공기역학 실험실 소개

박 승 오¹⁾

1. 머리말

오늘날 공학의 발전은 복잡한 물리적 현상을 기술하는 수학적 모델링과 이를 정확히 계산할 수 있는 수치적 능력에 의해서 이루어졌다고 해도 과언이 아니다. 20세기 중반 발명된 컴퓨터는 반세기가 지난 이 시점에서 비약적인 성능의 발달로 여러 분야에서 불가능한 것으로 여겨졌던 많은 문제들을 수치적으로 해결하는데 큰 도움을 주고 있다.

컴퓨터의 성능이 향상됨에 따라서 복잡한 기하학적 형태뿐만 아니라 많은 다양한 조건들을 포함한 경우에 대해서도 수치적 연구가 가능해지고 있다. 하지만, 이와 함께 실험적 연구의 중요성도 또한 강조되고 있다. 실험적 연구의 결과는 수치적 연구의 결과에 대한 정확성 검증과 기초 자료를 위해서 필요할 뿐만 아니라 모든 경우의 조건을 고려하기는 불가능한 실제적인 문제에 대해서는 수치적 연구만으로는 정확한 해석이 불가능하기 때문이다. 그렇기 때문에 본 연구실에서는 수치적 연구뿐만 아니라 실험적 연구도 같이 수행하고 있다.

본 연구실에서 수행하고 있는 연구로는 압축성 난류유동 해석을 위한 모형개발, 비정상 압축성 유동장의 대와류 모사(LES), 비정상 압축성 층류 유동장 해석코드를 이용한 초음속 충돌 제트 유동장 해석, 비압축성 유동장 해석코드를 이용한 공동유동 제어, 상용코드를 이용한 산업적 유동문제 해석 등의 공기역학적 흐름의 예측 능력을 높이거나 실험적으로 규명하기 까다로운 유동현상을 해

석하고, 풍동을 이용한 유동의 구현을 통하여 공기역학적 기초를 탐구하는 실험적 연구들이 현재 진행되고 있으며, 이러한 유동해석과 함께 여러 가지 열전달 현상을 고려한 문제들도 연구되고 있다.

2. 주요 연구 분야 - 수치적 연구

2.1 V2F 모형을 이용한 압축성 난류 유동의 해석

초음속 유동에서의 난류 유동의 정확한 계산은 표면 마찰력이나 표면열전달율의 정확한 예측을 위해 중요한 요소이다. DNS나 LES의 발달에도 불구하고 여전히 다양한 유동의 해석에는 난류모형이 사용되고 있는 실정이다. 난류 모형은 비압축성 유동에 대해 주로 개발되어 왔고, 압축성 난류유동의 경우 실험의 어려움과 수식의 복잡함으로 인하여 여전히 많은 연구가 진행되고 있는 실정이다.

90년대에 개발된 Durbin의 V2F 모형은 모형 자체의 우수함으로 인하여 많은 주목을 받았다. 이 모형은 벽면 근처에서의 적당한 난류 속도 스케일로, 일반적인 2방정식 모형에서 사용하는 k 가 아닌 벽면에 수직한 방향의 속도 요동 성분인 $\overline{v^2}$ 를 사용한다는 특징을 가진다. 또한 벽 근처에서 감쇠 함수나 형상에 관계된 파라미터를 사용하지 않고 타원형의 이원방정식을 사용함으로써, 사용자의 임의성을 배제하며 복잡한 형상의 계산에서 정렬격자나 비정렬 격자 모두에서 쉽게 적용할 수 있다.

타원형의 이원방정식이 충격파가 존재하는 압축성 유동에의 적용이 타당한지에 대해서는 많은

*1 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

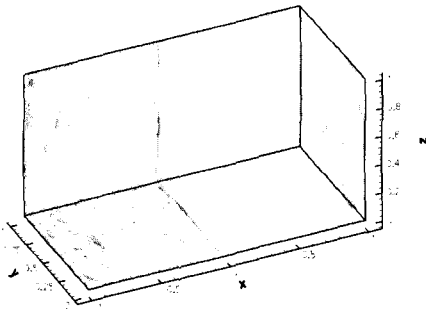


Fig. 1 충격파를 포함하는 압축성 난류 유동장에서의 등압력선도

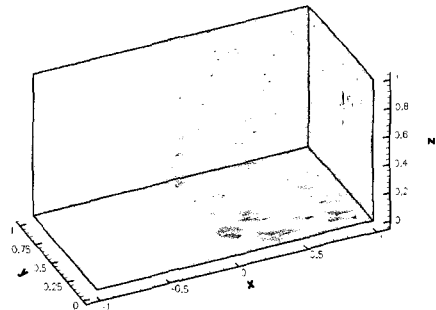


Fig. 2 충격파를 포함하는 압축성 난류 유동장에서의 등속도분포도

의문이 제시되었으나, 최근에 천음속 유동에서의 적용을 통한 압축성 유동에의 적용 가능성에 대한 연구결과가 발표되었다. 그러나, 충격파를 전후로 한 타원형 방정식의 적분 에러로 인한 수렴성이 좋지 않다는 문제점이 지적되었다. 따라서 천음속 유동에 비해 보다 강한 충격파가 생성되는 초음속 유동에의 적용을 통하여 V2F 모형의 압축성 유동에 대한 적용 가능성을 시험하고, 수렴성을 향상시킬 수 있는 수치적 방법에 대한 연구를 수행 중이다.

V2F 모형에 사용되는 실현가능 조건(realizability condition)은 일반적인 2방정식 모형의 단점 중 하나인 정체점에서 과도한 난류 운동 에너지가 생성되는 문제점을 보완해 준다. 그러나, 이 조건의 유도 과정에서의 수학적 오류로 인하여 실제 모형에서 사용되는 제약조건은 과도한 제약이 가해짐으로 인해 물리적으로 타당하지 못한 해를 나타내는 것으로 보인다. 또한, 이 조건은 비압축성 난류 유동에 대해 유도되어 졌기 때문에, 압축성 난류 유동에는 바로 적용할 수 없다는 문제점이 있다. 따라서, 수학적으로 타당한 실현가능조건과 함께 압축성 난류 유동에 적용할 수 있는 실현가능조건에 대한 연구를 수행중이다.

2.2 압축성 유동장의 대와류 묘사

공학에서 중요한 유체 역학의 문제는 대부분 난류 유동의 영역에 존재한다. 불과 몇십년 전까지만 해도 난류 유동장의 해석은 실험적인 기초에 의존하였다. 하지만 최근에는 급격히 발달한 컴퓨터 기술에 힘입어 수치 기법이 많이 사용되고 있

다. 초창기에 사용한 수치 기법은 Navier-Stokes 방정식에 시간 평균을 한 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)식을 수치적으로 해석하는 일이었다. 이 방법은 공학에서 필요한 정보가 시간 평균을 한 물리량이므로, 계산 결과를 직접 활용할 수 있는 장점이 있다. 현재 대부분의 상용 프로그램에서는 시간 평균을 이용한 계산 방법을 지원하고 있다. 시간 평균 방법은 RANS식에 필요한 난류 모델이 난류의 자유도를 다 표현하지 못한다는 근본적인 문제를 안고 있다. 따라서 난류를 보다 잘 묘사하기 위한 방법이 모색되었는데, 이 방법이 직접수치모사(DNS, Direct Numerical Simulation)방법이다.

DNS는 초기에 만들어진 3차원 난류 유동장을 Navier-Stokes식을 사용하여 매 차분시간마다 직접 계산하므로, 난류에 대한 매우 정확하고 많은 정보를 제공한다. 하지만, DNS는 과도한 계산 시간비용으로 인해 공학적으로 필요한 높은 레이놀즈 수의 유동은 묘사할 수 없는 상황이다. 대와류해석(LES)은 DNS와 RANS를 절충한 방법이라 할 수 있다.

LES는 3차원의 비정상 난류 유동의 대와류만을 계산한다. 이를 위해 Navier-Stokes식에 Filter를 취하며, 이를 통해 소와류는 모델로 처리하게 되고 대와류는 매차분시간마다 계산되게 된다. 따라서 계산 비용은 DNS에 비하여 매우 작은 반면, 대와류에 대해서는 정확한 계산 결과를 얻을 수 있다. LES는 소와류를 모델하는 방법에 따라 구분할 수 있으며, Smagorinsky model, Dynamic

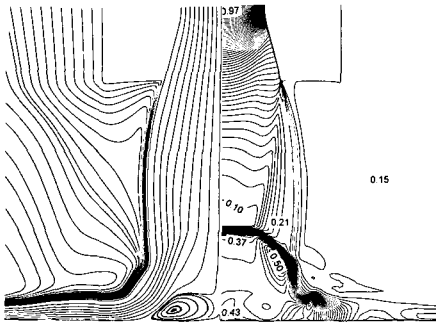


Figure. 3 Streamline and iso-density contour for the case with separation bubble, $PR=1.2$

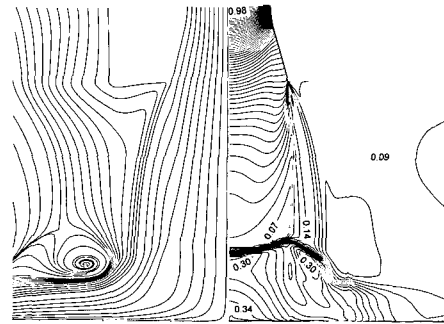


Figure. 4 Streamline and iso-density contour for the case without separation bubble, $PR=2.0$

model, Similarity model, Mixed model 등이 있다. 압축성 유동장에서의 LES는 비압축성 유동장에 비하여, 충격파 처리, 열역학 변수들의 처리 등의 연구과제로 남아 있다.

2.3 초음속 충돌 제트 유동

초음속 충돌 제트 유동은 항공우주 응용분야의 다양한 곳에서 나타난다. 발사체나 유도탄 등의 발사에서 그 해석이 요구되며, 다단 로켓의 단 분리 과정 등에서도 나타난다. 초음속 충돌 제트는 초음속과 아음속 영역이 공존하며, 충격파와 팽창파의 상호 작용이 일어나고, 벽면과 제트의 경계층에서 전단 유동 발생하는 등, 복잡한 유동 구조를 지닌다. 초음속 충돌 제트에 대한 많은 연구가 지난 30여 년 동안 이뤄졌지만, 초기에는 실험적 연구를 통하여 충돌 표면의 평균 압력 분포 등을 측정하고 유동을 가시화 하는 것에 제한되었다.

초음속 제트가 물체에 충돌하게 되면, 초기의 충돌에 따른 비정상 거동뿐만 아니라, 초기 비정상 거동이 지난 후에도 제트의 유동 조건 및 충돌면까지의 거리 조건 등에 의하여 충돌 영역에서 충격파의 진동, 재순환 영역 발생 등을 동반한 비정상 거동이 나타나는 것으로 알려져 있다. 지금까지 수행된 본 연구 결과에 의하면 진동이 발생하는 초음속 충돌 제트의 경우, 진동에 의한 압력 및 온도 변화의 크기가 충돌면에 미치는 평균 압력 및 온도의 최대 크기에 비하여 무시할 수 없는 경우도 있는 것으로 나타났다. 진동하는 압력 및 열응력은 구조물의 피로 하중을 증가 시켜 심각한 문제를 일으킬 수 있다. 본 연구에서는 비정상 축대칭 또는 3차원 Navier-Stokes 방정식을 이용하

여 초음속 충돌 제트 유동장에 대한 수치해석을 수행하여, 이 유동을 지배하는 물리적 특성에 대한 이해를 넓히고, 충돌 제트에서의 bubble, 진동 현상 등과 연관된 비정상 유동 특성에 대하여 살펴보고자 한다.

본 연구에서는 비정상 유동 해석을 수행하여야 하므로 2차의 시간 정확도를 갖는 내재적 시간적분법을 사용하였다. 지배방정식의 적분을 위해서는 기본적으로 유한 체적법(finite volume method)을 적용하고, 그 중 공간이산화 기법으로 셀 경계면에서 점성 플럭스(viscous flux)는 중앙차분식(central difference)으로 계산하고, 비점성 수치 플럭스의 계산에 MLDFSS (Modified Low-Diffusion Flux-Splitting Scheme)를 사용하였다. 이렇게 얻어진 이산화 방정식을 내재적(implicit) point SGS 기법을 사용하여 계산하였다.

초음속 충돌 제트 유동에서 충돌 영역의 서로 다른 유동 특성에 따라 두 개의 유동 구조를 볼 수 있다. 첫 번째는 충돌 영역에 separation bubble이 존재하는 경우이고(Fig. 3), 두 번째는 그렇지 않은 경우이다(Fig. 4). 이러한 유동 구조는 충돌제트의 여러 조건에 따라 결정된다. Fig. 5는 convergent-divergent nozzle의 초음속 충돌 제트 유동에서 노즐과 충돌면과의 거리를 고정시키고 압력비($PR=Pe/Pa$)를 다르게 하였을 때, 서로 다른 유동 구조를 가짐을 보여준다. 초음속 제트가 평면에 충돌하면 plate shock을 생성하게 된다. 과도한 팽창으로 인한 제트 충격파(jet shock)는 충돌면 위의 plate shock과 만나 삼중점(triple-shock structure)을 만들게 된다. 이때 slip line으로 알려진 shear layer가 삼중점으로부터 야기되어 평면에 충돌하게 된다. 이 slip line의

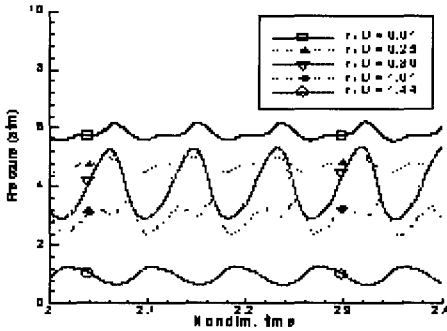


Figure. 5 Wall pressure time history (D : nozzle exit diameter)

정체점 압력이 상승하여 중심부 압력보다 충분히 커지면 박리와 함께 stagnation bubble을 생성하게 된다. 이때 충돌면의 압력 분포에서 최고 압력은 중심에서 어느 정도 떨어진 위치에서 나타난다 (annular peak).

초음속 충돌 제트 유동장에서 충돌 표면에서 시간에 따른 압력 변화를 살펴보면, Fig. 5와 같이 진동하는 현상을 확인 할 수 있다. 진동하는 압력의 주파수는 수kHz에서 수십kHz의 특성을 가지는 것으로 나타났으며, 그 최대 진폭은 최대 평균 압력의 40%에 달하기도 한다. separation bubble이 없는 경우의 진동 현상은 Hartmann - resonance와 같은 원리로 plate shock의 진동이 동반된 비정상 거동을 보이며, 위치에 따라 그 진폭은 달라도 같은 주파수를 가지는 것에 반하여 bubble이 있는 경우의 비정상 거동은 bubble이 없는 경우에 비하여 진동 특성(진폭 및 주파수 모두)이 달라지는 것으로 나타났다. 유동장의 비정상 거동과 separation bubble의 움직임 등에 대하여 정확한 이해를 위해서는 recirculation 영역의 난류 특성 및 bubble의 움직임의 3차원 효과 등을 고려한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

2.4 공동(Cavity) 유동 제어

항공기의 이착륙 장치나 폭탄 투하 장치(bomb bay), 자동차의 선루프(sun roof) 그리고 레이저 발생 장치 등에서 공동(cavity) 형상이 나타나는 경우가 많다. 이때 공동의 형상과 유동 조건에 따라 공동 위를 지나는 압력과 속도 값이 시간에 따

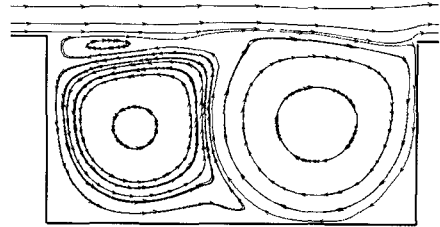


Fig. 6 Shear layer mode

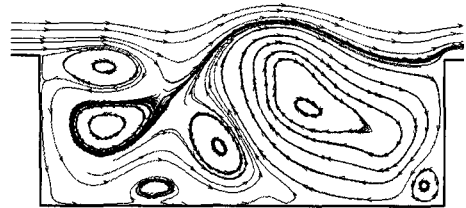


Fig. 7 Wake mode

라 변화게 되는데 이 변화는 구조물의 피로도를 증가시키게 된다. 그리고 공동의 앞전과 뒷전의 형상은 압력과 속도 변화에 따른 소음 발생의 원인이 된다. 이러한 나쁜 영향을 줄이거나 제거하기 위해 오래전부터 공동 주위 유동에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다.

공동 주위 유동은 크게 3가지 모드로 나뉘는데 시간에 따른 유동의 물성치 변화가 없는 정상모드 (steady mode), 공동의 앞전에서 보오텍스 (vortex)가 떨어져 나와 공동 위를 타고 뒷전에서 부딪치는 전단층모드 (shear layer mode) 그리고 앞전에서 떨어진 보오텍스가 공동 내부로 들어갔다가 뒷전으로 다시 빠져 나오는 웨이크모드 (wake mode)가 있다

이러한 유동의 모드에 영향을 미치는 변수로는 공동의 길이대 깊이비(L/D), 유동의 속도와 공동 앞전에서 흘러 들어오는 경계층의 두께 등이 있다. 길이대 깊이비와 속도는 그 값이 클수록 유동이 불안정해지며 경계층의 두께 크기는 작을수록 유동의 불안정해 지는 것을 수치적 모사 및 실험을 통해서 알 수 있다.

공동 유동의 특성과 이에 영향을 미치는 중요한 변수들을 이해한 연구 결과를 바탕으로 이러한 비정상적인 유동의 변화를 줄이거나 없애기 위해 유동을 제어한다. 유동의 제어 방법에는 여러 가

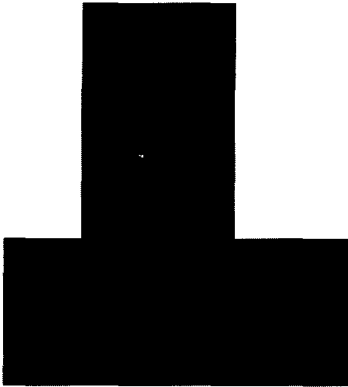


Fig. 8 정지된 배의 Moonpool

지가 있는데 수치적으로 모사하기 쉬운 Blowing & Suction 방법과 앞전에서 fence 진동을 이용하여 제어하게 된다. 이때 제어를 가하는 진동수(frequency)와 제어 크기(amplitude), 위상차(phase)에 따라 유동의 변화가 줄어들거나 더 커지게 되는 결과를 얻을 수 있다

최적 제어를 수행하기 위해 유동을 지배하고 있는 모드를 POD(Proper Orthogonal Decomposition)와 같은 방법을 이용하여 추출하여 이러한 모드에 반대 위상의 유동 진동을 가해 변화를 줄이게 된다.

2.5 Moonpool내의 유동현상 연구

Moonpool이란 시추를 위한 장치로써 선체 중앙부에 큰 우물 형태의 위 아래로 뚫린 구멍형태이다. Moonpool을 장착한 Drill ship의 건조가 증가하는 추세이지만 moonpool 이 선박의 운동 시나 정지 시에 저항의 측면에서 선박의 운동 성능에 어떤 영향을 미치는지, moonpool 내부의 유동은 어떠한지에 대해 수치적으로 연구된 바는 거의 없는 실정이다.

Moonpool의 geometry는 cavity와 비슷하지만 free surface가 존재하므로 수면의 움직임과 그 움직임의 정도가 moonpool을 연구하는 데 있어서 중요한 factor이다. 수면을 추적하기 위해서 이용한 수치 기법이 V.O.F.(Volume Of Fluid)이다.

상용 프로그램인 Fluent를 이용해 수치해석을 하고 있으며, 현재 2차원 moonpool의 계산을 수행중이다.

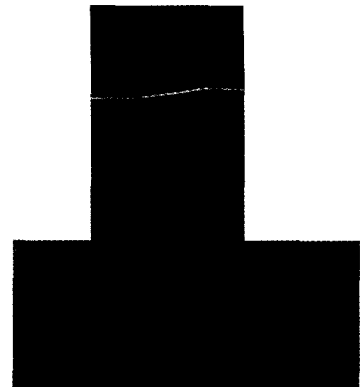


Fig. 9 Moonpool내 수면 변화

Moonpool 내부의 자유 표면 (Free Surface)의 움직임을 계산함으로써, 수면의 움직임이 moonpool의 운동 특성에 어떤 영향을 미치는가를 알 수 있고, moonpool이 장착된 배를 설계함에 있어서 moonpool로 인해 발생하는 저항의 크기 예측 또한 가능하리라 본다.

3. 주요 연구 분야 - 실험적 연구

본 연구실의 실험적 활동은 실험 교육의 중요성을 인식하여 학사과정을 교육하기 위한 실험(압력 측정, 양·항력 측정)과 논문연구로 구분되어 실시되고 있다.

논문연구의 주요 대상은 주로 열선폭속계를 이용한 2차원 비정상 난류 후류 측정, 3차원 비정상 날개의 tip vortex 측정, 저속 난류 흐름의 가시화등을 중심으로 이루어져 왔다.

4. 맺 음 말

이번 기회를 통해 본 연구실의 소개와 함께 연구실에서 수행하는 주요 연구 활동에 대해 소개하였다. 본 연구실은 공기역학분야 발전을 위한 기초 연구에서부터 산업응용 연구 및 정부 과제에 이르기까지 다양한 분야에 대하여 연구개발 과제를 수행하고 있다.